Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 2. 2024.(15-30)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Investigation of the Mechanical Properties of Stainless Steel foams Manufactured Through Leachable Spherical Urea Granules as a Space Holder

Research Article

Masoud sahraei[1], Ali Mohammad Naserian-Nik [2] , Hamid Sazegaran[3]

DOI: 10.22067/jmme.2024.83785.1120

1. Introduction

Stainless steel foams are a suitable alternative for non-foamed stainless steel in products such as sandwich panels, high temperature oil/gas filters, heat exchangers and high temperature catalysts. These materials can be manufactured by various methods such as impregnation, slurry foaming, laser melting, hot isostatic pressing, and the use of a space holder. Many researchers have produced foams of stainless steel and other metals using urea grains as space holder and pre-curing immersion methods. Mirzaei and Paydar fabricated stainless steel foam 316L with 71.5% porosity using urea granules.

2. Experiments

Austenitic stainless steel 316L powder was purchased from Tijo Chinese company with a purity of 99.9% as raw material. The urea granules were prepared from Bojnoord Petrochemical Company. The diameter of urea granules is between 1.4 and 2.6 mm with an average of 2 ± 0.2 mm. Spherical urea granules were chosen as space holder, because they are easily leached at low temperatures without reaction with stainless steel powder. A water-based polyvinyl alcohol solution was used as an organic binder to ensure that the metal powder particles adhere to the urea granules and also to provide sufficient strength. The powder metallurgy method based on the use of leachable space holder was applied to fabricate the cells and 316L stainless steel foam. The leaching process in a hot water bath and drying in a hot oven were sequentially used to remove the space holder. The advantage of using a hot water bath to remove the space holder is that the produced foam experiences less thermal stress. In manufacturing process, the stainless steel powder coated on the urea granules (30, 32.5, 35, 37.5, and 40 wt.%). Then, the coated urea granules were placed in a cylindrical steel mold and the compaction process was done by a hydraulic press under five different pressures: 150, 175, 200, 225 and 250 MPa. Then, the green specimens were removed from the mold and transferred to a hot distilled water bath to dissolve the urea granules. At this stage, about 90% of urea granules and polyvinyl alcohol glue are removed. Finally, after performing the sintering process, the manufactured foams are ready to determine the density and porosity percentage and evaluate the microstructure. In addition to experimental tests, the finite element method was employed to simulate the compressive behavior of steel foams.

3. Results and Discussion

The stress-strain curves obtained from the compression test for the fabricated foams are shown in Fig. 1. As can be seen, both factors of amounts of urea granules and applied pressure affect the stress-strain curves. Mechanical properties including: modulus of elasticity, plateau region, strain-softening and strain-hardening have been calculated from stress-strain curves. Increase in the pressure during the compaction stage generally leads to increase in the yield strength (Fig. 1-a). This can be due to the fact that with increasing the pressure, the steel powder particles become closer together, enhancing cold bonding between them. It can be seen that the stainless steel foam with urea content of 32.5 wt.% and the applied pressure of 175 MPa has the highest strain-softening and strain-hardening compared to other specimens. The dependence of the strain-softening and strain-hardening to the applied pressure is not significant, however generally, in the porosity range studied here, with the decrease in the amounts of urea granules, the strain-softening and the strain-hardening decreases. The lowest strain-hardening and the lowest strain-softening correspond to the specimen with 40 wt.% of urea. The highest elasticity coefficient is about 681 MPa for the specimen with 30 wt.% of urea and applied pressure of 250 MPa. The elasticity coefficient has inverse relationships with the increase of decreasing the

*Manuscript received: August 7, 2023, Revised September 30, 2023, Accepted, February 26, 2024.

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

[2] Correspounding Author: Assistance Professor Depa,rtment of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran. **Email**: a.naserian@qiet.ac.ir.

[3] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

porosity and increasing the applied pressure. With the reduction of the porosity, the length of plateau in stress-strain curve decreases, and the length of this region does not depend on the applied pressure. The SEM micrographs of surface fracture of the specimen containing 30 wt.% urea and applied pressure of 250 MPa show that urea granules have been completely removed and full spherical cells have been formed (Fig. 2). It is clear that the dispersion of urea granules has been well done and the cells have been connected to each other. In addition, micro porosities in micron dimensions are observed at the boundary of sintered steel powder particles, and this is a great factor for energy absorption. Simulation of mechanical behavior is a relatively new method to evaluate steel foams. Fig. 3-a shows the deformation and stress distribution resulting from the compressive test simulation, when the specimen breaks. By comparing the experimental and simulated results, it can be said that the destruction mechanism of both experimental and simulated specimens occurs almost similar to each other. The stress-strain curve extracted from the software shows that there is an acceptable agreement between the experimental results and the simulation results (Fig. 3-b). The main difference is related to the sharp drop of stress after the yield point in the simulation curve compared to the experimental curve, which can be attributed to a rapid crack growth in the simulated model.

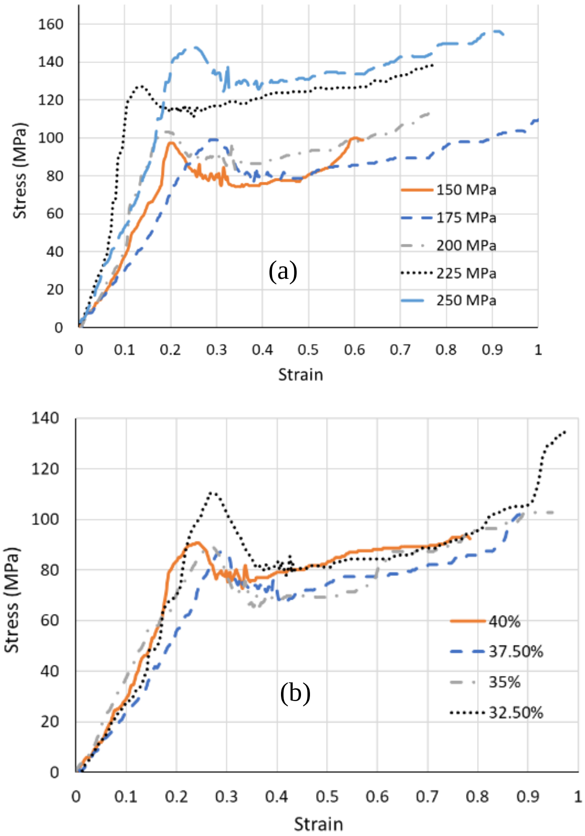


Fig. 1. Compressive stress-strain curves. a) 30 wt.% of urea and b) 250 MPa applied pressure.

4. Conclusion

1. The optimal applied pressure and amounts of urea granules for the manufacturing of 316L stainless steel foam are 250 MPa and 30 wt.%, respectively. For this case, the yield strength and ultimate strength were measured to be 152 and 158 MPa, respectively.
2. The suitable temperature and time for sintering the 316L stainless steel foam is 1200°C for 1 h.
3. The amounts of urea granules and applied pressure are effective factors in the mechanical behavior of 316L stainless steel foam, and generally, the strength is improved by reducing the porosity (reducing the amounts of urea) and increase of applied pressure.
4. The compression test of steel foams was successfully simulated. The stress-strain curve was extracted with the finite element method by explicitly modeling the holes.

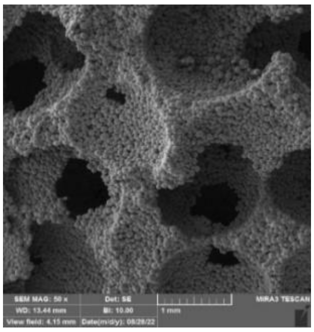


Fig. 2. SEM of foam surfaces with 30 wt.% of urea and applied pressure of 250 MPa.

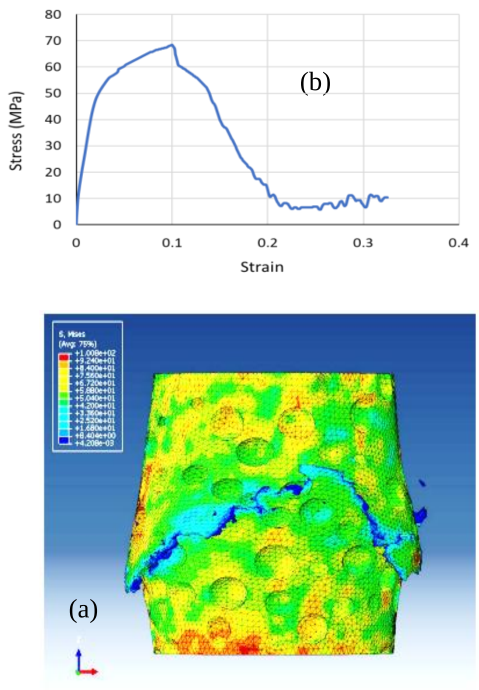


Fig. 3. The simulation results of the pressure test: a) the failure of the model and b) the resulting stress-strain curve.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۵، ۲، ۱۴۰۳. (۳۰-۱۵)

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

ارزیابی رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن تولید شده به روش انحلال دانه‌های کروی اوره به عنوان فضاساز*

مقاله پژوهشی

مسعود صحرائی[۱] علی محمد ناصریان نیک[۲] حمید سازگاران[۳]

DOI:10.22067/jmme.2024.83785.1120

چکیده فوم‌های فلزی یا فلزات سلولی خانواده‌ای از مواد نو و پیشرفته به شمار می‌آیند که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد شان، امکان زیادی برای توسعه در سال‌های آینده خواهند داشت. پژوهش حاضر به ساخت فوم‌های فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L که کاربردهای نسبتاً وسیعی در صنایع پزشکی (به ویژه ساخت ایمپلنت‌ها) دارد، می‌پردازد. برای این منظور، از روش متالورژی پودر و انحلال دانه‌های کروی اوره در آب به عنوان فضا نگه‌دارنده استفاده شد. اندازه‌گیری تخلخل، ارزیابی دیواره سلول‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون فشار روی نمونه‌های فولادی انجام شد. اثر میزان تخلخل و فشار اعمالی در طی فرآیند تولید روی رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، برای اولین بار، آزمون فشار توسط مدل صریح المان محدود فوم فولادی با ۳۰ درصد تخلخل شبیه سازی شد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین استحکام تسلیم، استحکام نهایی و ناحیه پلاتو در فوم فولاد زنگ‌نزن با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی برابر با ۲۵۰ مگاپاسکال رخ داده است. تصاویر میکروسکوپی بیانگر آن است که اتصال ذرات آهن به خوبی صورت گرفته است و سلول‌ها مطابق با هندسه دانه‌های اوره، کاملاً کروی شکل هستند. علاوه بر این، مکانیزم تخریب نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های شبیه‌سازی شده تقریباً شبیه یکدیگر رخ می‌دهد.

واژه های کلیدی فوم فولاد زنگ‌نزن، ذرات کروی اوره، ، فشار، فضاساز.

Investigation of the Mechanical Properties of Stainless Steel Foams Manufactured through Leachable Spherical Urea Granules as a Space Holder

Masoud Sahraei Ali Mohammad Naserian-Nik Hamid Sazegaran

Abstract *Foam materials are a family of new and advanced materials that due to their unique characteristics, will have a lot of potential for development in the coming years. The current research deals with the production of metal foams made of 316L stainless steel, which has a relatively wide application in the medical industry (especially in the production of implants). For this purpose, the methods of powder metallurgy and dissolving spherical urea particles in water has been used as a spacer have been employed. Porosity measurement, cell wall evaluation by scanning electron microscope and pressure test on steel specimens have been investigated. The effect of porosity and applied pressure during the production of the foams on their mechanical behavior have been studied. In addition to conducting experimental tests, the compressive test was simulated using an explicit finite element model for a steel foam with 30 percent of porosity. The results indicate that the failure mechanism of both experimental and simulated specimens occur approximately similar.*

Keywords Stainless steel foam, Spherical urea particles, Pressure, Space holder.

* تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۲/۵/۱۶و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۲/۷ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان.

(۳) استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان.

Email: : a.naserian@qiet.ac.ir

مقدمه

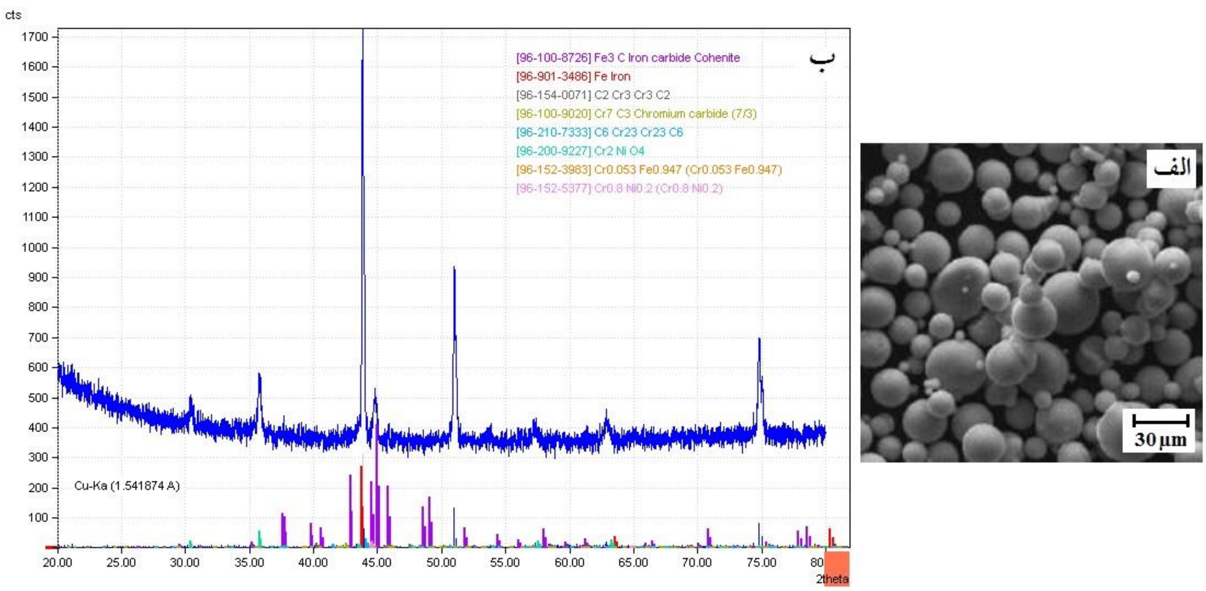
فوم فولاد زنگ‌نزن مجموعه‌ای از رفتارهای متفاوت شامل: وزن سبک، استحکام بالا، قابلیت جذب انرژی فراوان و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی عالی را از خود ارائه می‌دهد [1]. این فوم‌ها در کاربردهای مختلفی همانند مهندسی عمومی، هوا–فضا، حمل و نقل، شیمی، نظامی و کاربردهای زیست پزشکی در حال مطالعه هستند [2]. فوم‌های فولادی زنگ‌نزن جایگزین مناسبی برای فولاد زنگ‌نزن غیرفومی در محصولاتی مانند ساندویچ پنل‌ها، فیلترهای روغن/گاز با دمای بالا، مبدل‌های حرارتی و کاتالیزور با دمای بالا خواهند بود [3]. شایان ذکر است که تحقیقات زیادی روی فوم‌های سایر فلزات همچون تیتانیوم [4] و نیکل [5] انجام شده است. با توجه به هزینه بالای این مواد، فوم‌های فولادی زنگ‌نزن در حال حاضر کاندیدای جذابی برای مهندسی دما بالا و کاربردهای زیست پزشکی هستند. علاوه بر این، این دسته از فوم‌ها دارای مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون عالی و ویژگی‌های مکانیکی خوبی هستند [6,7]. این مواد را می‌توان با شیوه‌های مختلفی همانند اشباع [8]، فوم‌سازی دوغابی [9]، ذوب لیزری [10]، پرس ایزواستاتیک داغ [11] و استفاده از فضاساز یا نگه‌دارنده فضا [12] تولید کرد. در میان این روش‌ها، روش فضاساز، روشی بسیار ساده و ارزان است که امکان به‌دست آوردن ساختارهای سلول باز با اندازه، شکل و توزیع مشخص و یکنواخت سلول‌ها و همچنین میزان تخلخل معین را به ارمغان می‌آورد.

در کل، دو نوع فضاساز وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای ایجاد سلول‌ها در فوم‌های سلول باز استفاده کرد. مواد فرار مانند بی‌کربنات آمونیوم [12]، نشاسته [13]، ساکارز [14] و منیزیم [15] دسته اول هستند و سایر فضاسازها که قابلیت انحلال یا شستشو را دارند و نمونه‌هایی از آن‌ها شامل: نمک خوراکی [16]، کاربامید [17] و برمید پتاسیم [18] می‌باشند. بسیاری از محققان، فوم‌های فولادی زنگ‌نزن و سایر فلزات را با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضاساز و روش غوطه‌وری قبل از پخت تولید کرده‌اند [19,20]. بکوز و اوکتای [21] از شیوه‌ای استفاده کردند که در آن از دو شکل مختلف دانه‌های کاربامید (کروی و نامنظم) برای تهیه ورق‌های فوم فولادی با تخلخل‌های ۴۹/۲ تا ۷۱/۰ درصد استفاده کردند و استحکام تسلیم فوم‌ها بین ۲۰ تا ۹۲ مگاپاسکال و ضریب کشسانی آن از ۰/۷۱ تا ۱۹/۲ گیگاپاسکال گزارش شده است. میزایی و پایدار [22] اقدام به ساخت فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L با میزان تخلخل ۷۱/۵ درصد با استفاده از کاربامید کردند. گلسوی و ژرمن [23] فوم فولاد زنگ‌نزن خود را با استفاده از روشی مشابه تهیه کردند. اکتای و مالتو [24]، نمونه‌ای از فوم فولاد زنگ‌نزن بسیار متخلخل را با استفاده از روشی مشابه با آنچه در بالا توضیح داده شد، تهیه کردند.

اوره یک ماده آلی ارزان و در دسترس است که به راحتی در آب حل می‌شود و در مقایسه با سایر فضاسازها قابلیت انحلال بسیار بالاتری دارد [25]. با این حال، فرآیند غوطه‌وری می‌تواند بر ساختار دیواره سلول‌ها موثر باشد، در برخی موارد اندازه منافذ را بزرگ می‌کند و در برخی موارد دیگر، باعث ایجاد ریزحفرات در دیوار سلول‌ها می‌شود [26]. تمام موارد فوق در صورتی رخ می‌دهند که فرآیند غوطه‌وری کنترل نشود و اغلب منجر به افت ویژگی‌های مکانیکی می‌گردد. اسمولیگو و همکاران [27] از ذرات درشت کاربامید به عنوان فضاساز برای تولید ساختارهای فوم تیتانیوم با استفاده از روش انحلال در آب استفاده کردند. مشخص شد که شکل سلول‌های فوم با میزان تخلخل بالاتر تغییر پیدا کرده است و دیوارهای سلول‌ها در برخی قسمت‌ها در طی فرآیند غوطه‌وری و شستشوی کاربامید از بین رفته‌اند. باید در نظر داشت که اوره با تبخیر نیز به راحتی قابل تجزیه است. این ماده، با فلزات واکنش نمی‌دهد و بدون تولید مواد مضر کاملا از درون فوم خام خارج می‌شود. جوشی و همکاران [28] از ذرات میکرو اوره به عنوان فضاساز استفاده کردند و از روش تبخیر بهره بردند. در منحنی‌های تنش–کرنش فوم‌های آن‌ها، منطقه پلاتو در مطالعه آن‌ها به دلیل اندازه سلول ریزتر مشاهده نشد. هر چند که مطالعات فراوانی بر روی شیوه‌های ساخت و تولید و همچنین تاثیرات نوع و مقدار فضاساز بر روی ریخت سلول‌ها و رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن صورت گرفته است، اما، هدف اصلی این مطالعه ارزیابی تاثیرات عوامل تولید (درصد اوره و مقدار فشار اعمالی) بر میزان تخلخل و رفتار فشاری فوم‌های فولادی زنگ‌نزن است.

جدول ۱ مشخصات پودر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L

عنصر	کروم	نیکل	مولیبدن	سیلسیم	منگنز	کربن	فسفر	گوگرد	اکسیژن	آهن
درصد وزنی	۱۷/۱۰	۱۰/۷۹	۲/۵۷	۰/۷۰	۱/۵۶	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۵۹	الباقی



شکل ۱ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و (ب) آنالیز طیف‌سنج پراش اشعه ایکس از پودر فولاد زنگ‌نزن استفاده شده

مواد و روش آزمون‌ها

مواد

پودر فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ L از شرکت چینی Tijo با خلوص ۹۹/۹ درصد به عنوان ماده اولیه استفاده شد. مشخصات این ماده در جدول (۱) ارائه شده است. الگوهای طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس پودر زنگ‌نزن با میکروسکوپ الکترونی (LEO 1450VP 35KV) اندازه‌گیری شد (شکل ۱). بیشتر ذرات پودر فولاد کوچک‌تر از ۲۳ میکرومتر با اندازه متوسط ذرات ۰/۲ ± ۱۳ میکرومتر و ذرات کروی و بی‌شکل هستند. اوره مورد استفاده از شرکت پتروشیمی بجنورد تهیه شده است. قطر دانه‌های اوره بین ۱/۴ تا ۲/۶ میلی‌متر است. قطر متوسط دانه‌های اوره ۰/۲ ± ۲ میلی‌متر است. اوره کروی به عنوان فضاساز انتخاب شد و علت آن به خروج راحت آن در دماهای پایین (۱۳۵ درجه سانتیگراد) و بدون واکنش با ذرات پودر فولاد زنگ‌نزن ارتباط دارد. یک محلول پلی‌وینیل الکل مبتنی بر آب (۵ درصد وزنی چسب پلی‌وینیل الکل و ۹۵ درصد وزنی آب مقطر) به عنوان یک چسب آلی برای اطمینان از چسبیدن ذرات پودر فلزی به دانه‌های اوره و همچنین ایجاد استحکام کافی، استفاده شد.

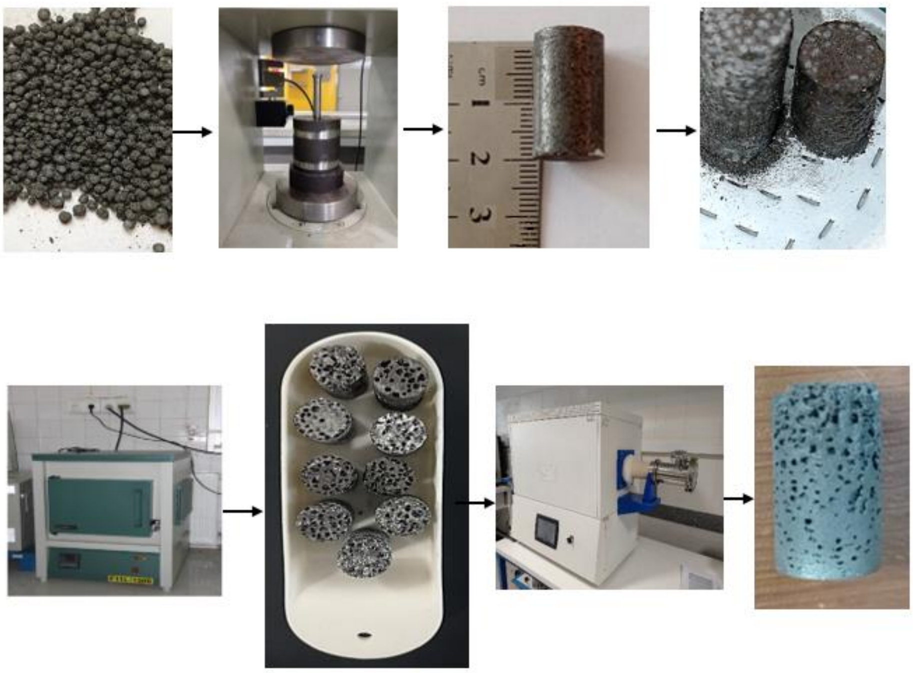
ساخت و تولید فوم‌ها

از روش متالورژی پودر مبتنی بر استفاده از فضاساز برای ایجاد سلول‌ها و تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L استفاده شد. فرآیند تولید شامل: پوشش‌دهی دانه‌های اوره توسط پودر فولاد زنگ‌نزن ، فشردن دانه‌های اوره پوشش یافته و تهیه نمونه‌های خام، غوطه‌وری نمونه‌های خام درون حمام گرم آب مقطر برای انحلال اوره و تف‌جوشی درون کوره است. قابل ذکر است که فرآیندهای غوطه‌وری در حمام آب گرم و خشک کردن در کوره گرم به صورت متوالی برای حذف فضاساز استفاده می‌شود. مزیت استفاده از حمام آب گرم برای برداشتن فضاساز این است که باعث می‌شود فوم تولیدی تنش حرارتی کمتری را تجربه کند و در نتیجه، رفتار مکانیکی بهتری به دست آورد. ابتداء، مطابق با وزن‌های محاسبه شده پودر فولاد زنگ‌نزن و اوره (درصد وزنی اوره برابر ۳۰، ۳۲/۵، ۳۵، ۳۷/۵ و ۴۰ در نظر گرفته شد)، مخلوط تهیه شده توسط پاشش آب مقطر مرطوب می‌شود و در ادامه، فرآیند اختلاط به همراه چسب پلی‌وینیل الکل درون مخلوط‌کن صورت می‌گیرد. زمان اختلاط برابر ۱۵ دقیقه انتخاب شد و بعد

از انجام این فرآیند، دانه‌های اوره پوشش یافته درون قالب فولادی استوانه‌ای شکل قرار داده می‌شوند و فرآیند فشردن توسط یک پرس هیدرولیک صورت می‌گیرد. فشارهای اعمالی برابر ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵ و MPa ۲۵۰ انتخاب شدند تا اثر میزان فشار اعمالی مورد مطالعه قرار گیرد. سپس، فوم‌های خام از قالب خارج می‌شوند و برای انحلال اوره، به حمام آب مقطر گرم منتقل می‌شوند. هر نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب مقطر گرم با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود و در ادامه، فرآیند خشک شدن در دمای اتاق صورت می‌گیرد. در این مرحله، حدود ۹۰ درصد وزنی اوره و چسب پلی‌وینیل الکل حذف می‌گردد. از آنجایی که در این مرحله تمام اوره و چسب به طور کامل حذف نمی‌شوند، از کوره پیش‌گرمایش برای حذف باقیمانده دانه‌های اوره و چسب پلی‌وینیل الکل بهره گرفته می‌شود. بدین منظور، فوم‌های خام در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت درون کوره قرار داده می‌شوند. سپس، فوم‌ها از کوره پیش‌گرمایش خارج می‌شوند و بعد از سرد شدن در هوا تا دمای اتاق به کوره اصلی تف‌جوشی با اتمسفر هیدروژن و نیتروژن (با ۲۵ درصد حجمی هیدروژن و ۷۵ درصد حجمی نیتروژن) منتقل می‌گردد. فرآیند تف جوشی به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. شایان توجه است که نرخ تغییرات دما برابر ۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه انتخاب شد، تا از ایجاد تنش حرارتی ممانعت به عمل آید. لازم به ذکر است که اتمسفر کوره تف‌جوشی، از اکسید شدن فولاد در دمای بالا جلوگیری می‌کند. در نهایت، پس از خارج شدن نمونه‌ها از کوره، فوم‌های تولیدی برای تعیین چگالی و میزان تخلخل و انجام آزمایشات ریزساختاری و فشار آماده هستند. جدول (۲) مشخصات نمونه‌های مختلف ایجاد شده به این روش را نشان می دهد. فرآیند کلی آماده‌سازی نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات فوم‌های تولیدی

فشار تولید فوم (مگاپاسکال)	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
درصد وزنی اوره	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۲/۵	۳۵	۳۷/۵	۴۰



شکل ۲ نمایش نحوه فرآیند تولید فوم فولاد زنگ‌نزن

اندازه‌گیری چگالی و تخلخل

میزان چگالی و درصد وزنی اوره فوم‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L که درصـــد وزنی اوره و میزان فشـــار اعمالی در آنها تغییر کرده اســـت، به روش اندازه‌گیری ابعادی و تعیین وزن توســـط یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ g تعیین شـــد. به منظور اندازه‌گیری چگالی فوم های فولادی از معادله (۱) و برای اندازه‌گیری درصد وزنی اوره آنها از معادله (۲) استفاده گردید [29-31]. قابل ذکر اســت که در معادله (۲)، چگالی جامد همان چگالی فولاد زنگ‌نزن بدون تخلخل برابر ۸ g/cm^3 در نظر گرفته شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{۱}$$

$$P\% = \left[۱ - \left(\frac{\rho_F}{\rho_S}\right)\right] \times ۱۰۰ \tag{۲}$$

در معادلات فوق، ρ چگالی، m جرم، V حجم، $P\%$ درصد وزنی اوره ، ρ_F چگالی نمونه فومی و ρ_S چگالی فولاد زنگ‌نزن بدون تخلخل است.

ارزیابی ریزساختاری

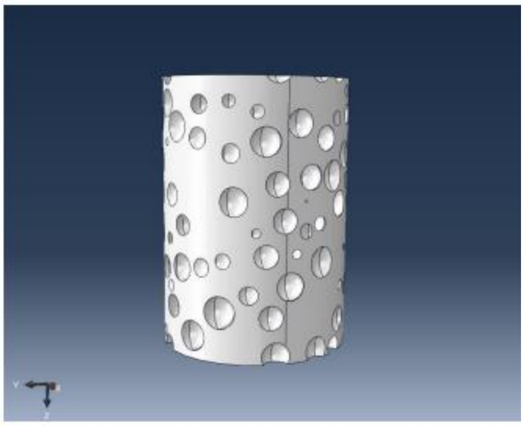
به منظور تعیین ریخت ذرات پودر مورد استفاده و همچنین مطالعه‌ی ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم‌های فولاد زنگ‌نزن ، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. فوم‌های فولادی زنگ‌نزن ابتدا توسط دستگاه وایر کات (Dk7732ZAC) در جهت عمود به محور برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانت گرم، سمباده‌زنی و پولیش‌کاری بر روی آنها انجام شد. نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط آلیاژ Au-Pd و با دستگاه Sputter Coater SC7620 پوشش‌دهی شدند و سپس، مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط دستگاه LEO 1450VP انجام شد. علاوه بر این، برای شناسایی ترکیب شیمیایی فازهای گوناگون تشکیل شده در دیواره سلول‌های فوم‌های فولادی از اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) استفاده شد.

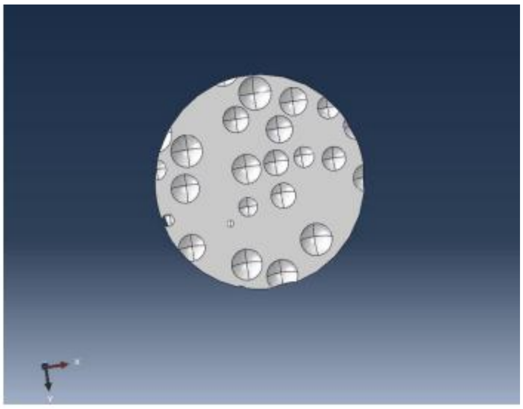
ارزیابی رفتار مکانیکی

در پژوهش حاضر، برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی مورد نظر از ۹ فوم فولادی تولید شده استفاده شد. قابل ذکر است که اثر تغییر درصد وزنی اوره و تغییر میزان فشار اعمالی در مرحله فشردن مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن از آزمون فشار هم‌محور استفاده شد. این آزمون توسط دستگاه آلمانی Zwick مدل Z250 انجام گردید. ابتدا، فوم‌های فولاد زنگ‌نزن توسط دستگاه وایرکات (Dk7732ZAC) در جهت عمود بر محور به گونه‌ای بریده شدند که نمونه‌ای استوانه‌ای تولید شد. قابل ذکر است که سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر ۲ mm/min انتخاب شد.

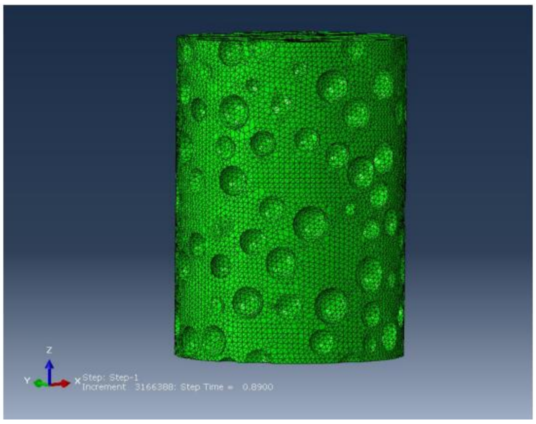
مدل‌سازی

شبیه‌سازی عددی آزمایش فشار فوم فلزی به کمک روش المان محدود برای یک نمونه با درصد تخلخل ۳۰ انجام شد. قبل از انجام شبیه‌سازی مدل CAD فوم فلزی به صورت یک استوانه به قطر ۱۴ و ارتفاع ۲۰ میلیمتر ایجاد شد. حفرات در مدل فومی از قطر ۶۰ میکرومتر تا ۲۰۰ میکرومتر بصورت تصادفی توزیع شده‌اند. تغییرات قطر حفرات در بازه مذکور یکنواخت است. از ضخامت دیواره حفرات چشم‌پوشی شده است. شکل (۳) مدل مذکور را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی آزمایش فشار در نرم افزار ابکوس (ABAQUS) (نسخه 2020) انجام شد. برای این منظور از دو نقطه مرجع در دو انتهای استوانه کمک گرفته شده است. یک انتهای مدل ثابت و به انتهای دیگر جابجایی اعمال می‌شود. سعی شده است رفتار مکانیکی ماده تشکیل‌دهنده مدل فومی نزدیک به رفتار نمونه با درصد تخلخل صفر منظور شود. برای شبیه‌سازی ترک و فرآیند شکست انجام شده از معیار آسیب ductile damage استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از حلگر صریح (Explicit solver) و روش مقیاس جرم (Mass scale) استفاده شده است. بدیهی است وجود تخلخل نیازمند اعمال شبکه‌بندی ریزتر برای حل صحیح می‌باشد (شکل (۴)).





شکل ۳ مدل CAD فوم فولادی



شکل ۴ نحوه مش‌زنی در نرم‌افزار آباکوس

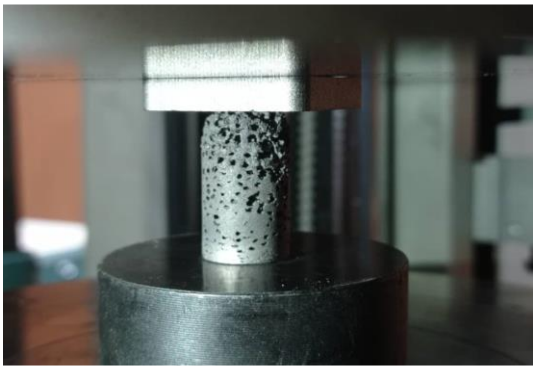
نتایج و بحث

رفتار مکانیکی

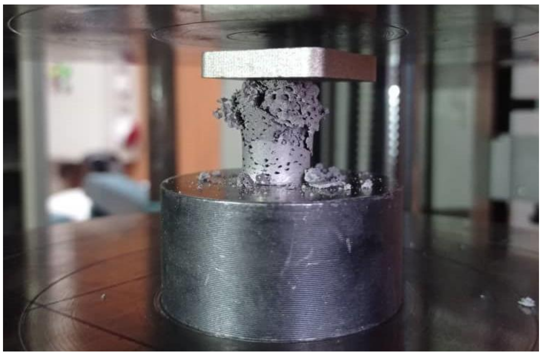
همان طور که قبلا نیز بیان شد، به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی فوم‌های فولاد زنگ‌نزن از آزمون فشار بهره گرفته شد. در شکل (۵)، نحوه قرارگیری نمونه‌های فومی تولید شده درون دستگاه آزمون فشار نشان داده شده است. منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمون فشار برای فوم‌های تولید شده در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود هر دو عامل درصد وزنی اوره و مقدار فشار اعمالی بر روی منحنی‌های تنش-کرنش موثر هستند. با کاهش میزان تخلخل و افزایش فشار اعمالی در مرحله فشردن بهترین نتیجه را از نظر استحکام نهایی و تسلیم فوم به دست می‌آوریم. در بررسی بیشتر نمودارهای کرنش-تنش به دست آمده از آزمایش فشار، این نتیجه به دست می‌آید که افزایش فشار در مرحله فشردن باعث می‌شود که ذرات پودر فولاد در طی فرآیند تولید بیشتر به هم نزدیک شوند و این خود باعث بهبود جوش سرد بین ذرات پودر می‌شود. در نتیجه، ماده خام تولید شده انسجام بیشتری خواهد داشت.

بنابراین، میزان تخریب دیواره سلول‌ها در طول فرآیند غوطه‌وری درون آب مقطر و همچنین فرآیند پیش‌گرمایش بسیار کاهش می‌یابد.

در نمونه حاوی ۳۰ درصد وزنی اوره، تنش تسلیم و تنش نهایی با افزایش فشار به تدریج افزایش می‌یابند. با افزایش میزان تخلخل به دلیل ایجاد فضای خالی بیشتر و همچنین افزایش سطوح شکستگی در دیواره‌ها، کاهش تنش تسلیم و تنش نهایی رخ می‌دهد. از طرف دیگر، دلیل بهبود تنش تسلیم با افزایش فشار اعمالی در طی فرآیند تولید به اتصال بهتر ذرات پودر فولاد در مرحله فشردن و همچنین در فرآیند تف‌جوشی نهایی فوم درون کوره ارتباط پیدا می‌کند که به نوبه خود تنش تسلیم را افزایش می‌دهد. در نمودارهای تنش-کرنش شکل‌های (۶) و (۷) استحکام نهایی از تنش تسلیم فراتر می‌رود، زیرا پس از عبور از نقطه استحکام نهایی، بخشی از فضاهای خالی موجود از بین رفته و ماده به صورت جامد متراکم‌تری درمی‌آید. همان طور که از نمودارهای به دست آمده مشخص است، فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی برابر با ۲۵۰ مگاپاسکال دارای بیشترین استحکام تسلیم و استحکام نهایی است که به ترتیب حدود ۱۵۲ و ۱۵۸ مگاپاسکال می‌باشند.

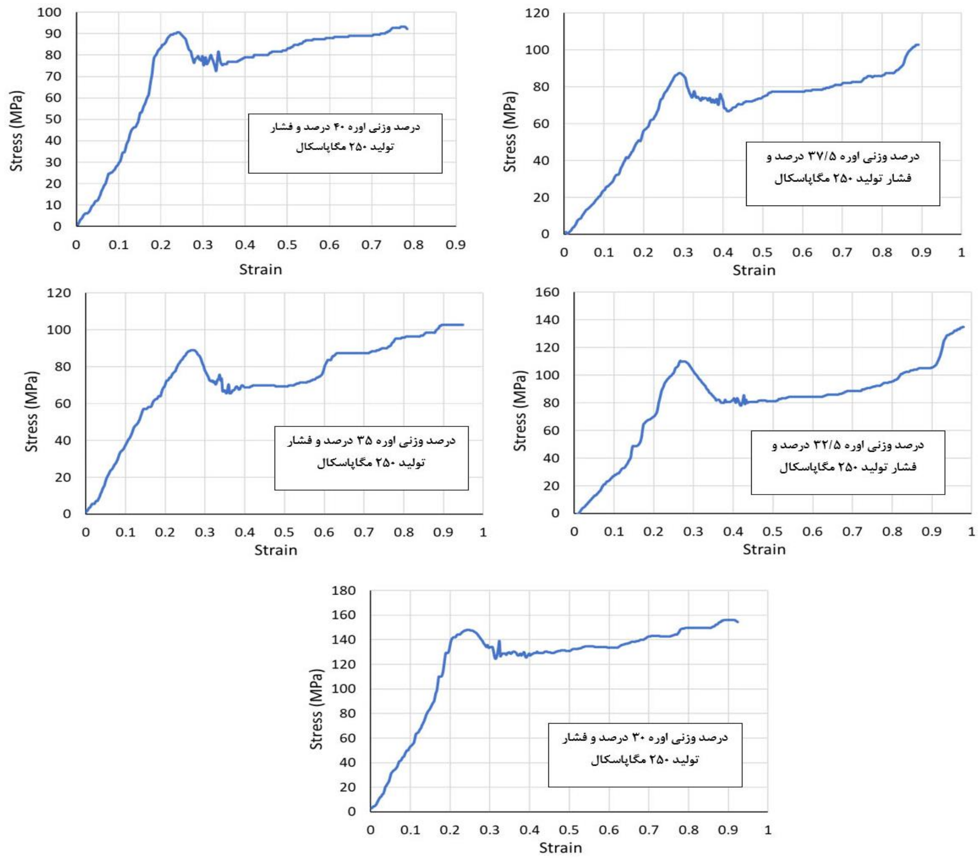


(الف)

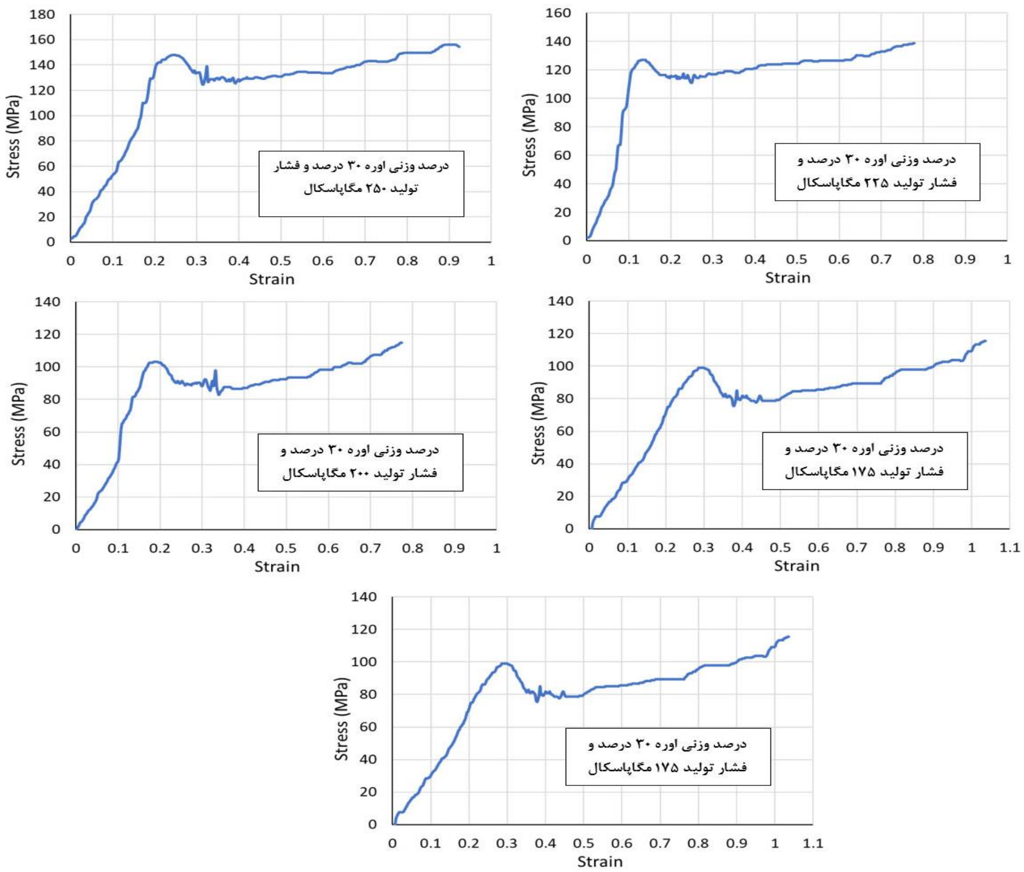


(ب)

شکل ۵ نمونه فوم بین فک‌های دستگاه آزمایش فشار (الف) قبل از اعمال فشار و (ب) در مرحله نهایی اعمال فشار

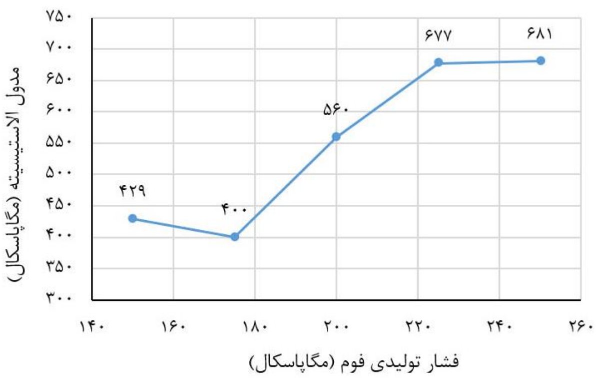


شکل ۶ نمایش اثر تغییر فشار اعمالی و درصد وزنی اوره ثابت در نمودار تنش-کرنش فشاری فوم‌های تولیدی.



شکل ۷ نمایش اثر تغییر فشار اعمالی و درصد وزنی اوره ثابت در نمودار تنش-کرنش فشاری فوم‌های تولیدی

با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمون فشار، چهار ویژگی مکانیکی شامل: ضریب کشسانی (مدول الاستیسیته)، طول ناحیه پلاتیو (Plateau)، کرنش نرمی (Strain softening) و کرنش سختی (Strain hardening) در فوم‌های تولیدی محاسبه شده‌اند. ضریب کشسانی در واقع معادل شیب خط در ناحیه الاستیک در نمودار تنش-کرنش است. ضریب کشسانی توسط شیب خط در محدوده الاستیک با برازش یک خط راست به محدوده الاستیک خطی (قبل از نقطه تسلیم) بر روی منحنی تنش-کرنش محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده برای فوم‌های تولیدی در این پژوهش مطابق نمودارهای شکل (۸) است. همان طور که در نمودارهای شکل (۸) مشاهده می‌شود، بیشترین ضریب کشسانی برابر با ۶۸۱ مگاپاسکال مربوط به فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال است. به طور کلی، روند افزایش ضریب کشسانی با کاهش میزان تخلخل و افزایش فشار اعمالی رابطه معکوس نشان می‌دهد.



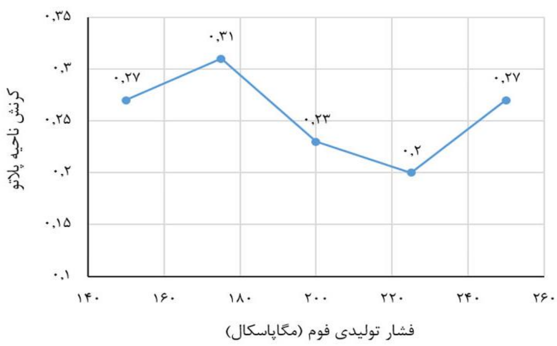
(الف)



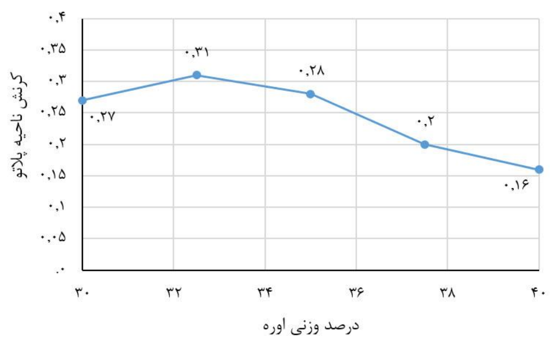
(ب)

شکل ۸ (الف) ضریب کشسانی برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره تحت فشارهای اعمالی مختلف و (ب) ضریب کشسانی برای فوم‌های تولیدی با مقدار اوره گوناگون و تحت فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال

ناحیه پلاتیو با جذب انرژی بسیار زیاد توسط فوم در حین اعمال فشار و فشرده شدن ماده همراه است که در طی آن، دیواره‌های سلول‌های توخالی ایجاد شده توسط خروج دانه‌های اوره تمایل به تحمل تنش دارند و در برخی نواحی پدیده شکستن به صورت موضعی رخ می‌دهد. برای محاسبه طول ناحیه پلاتو، طول قسمت دندانه‌دار نمودار تنش-کرنش اندازه‌گیری شد که از اختلاف مقادیر کرنش در ابتدا و انتهای قسمت دندانه‌دار به دست می‌آید. دلیل ناهمواری این ناحیه و تشکیل دره‌ها و قله‌های تنشی شکسته شدن دیواره سلول‌ها است. به طور کلی، با کاهش میزان تخلخل، کاهش طول این ناحیه اتفاق می‌افتد. نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که طول این ناحیه بستگی زیادی به فشار اعمالی در طی فرآیند تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ندارد. حداکثر طول مطابق نمودارهای شکل (۹) مربوط به نمونه با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال است که با نتایج قبلی مطابقت دارد.



(الف)



(ب)

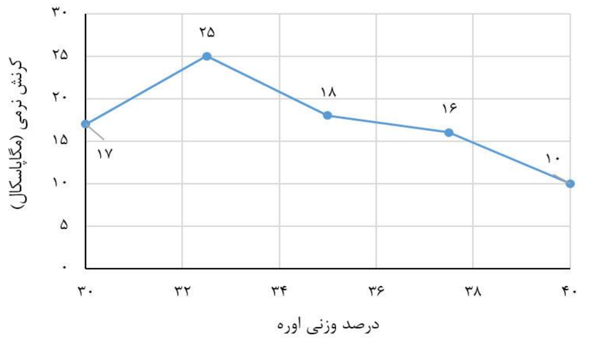
شکل ۹ (الف) طول ناحیه پلاتیو برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشارهای اعمالی مختلف و (ب) طول ناحیه پلاتیو برای فوم‌های تولیدی با درصدهای اوره مختلف و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال

کرنش سختی پدیده افزایش سختی و استحکام فلزات چکش‌خوار در هنگام تغییرشکل پلاستیک (دائم یا مومسان) است. به هنگام کرنش نرمی، سطح تنش با افزایش کرنش‌های

برشی کاهش می‌یابد و تغییرشکل پلاستیک ایجاد می‌شود. تغییرات کرنش نرمی و کرنش سختی فوم‌های تولید شده در این پژوهش با استفاده از نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش فشار و در قالب نمودارهای شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. کرنش سختی با استفاده از اختلاف مقادیر تنش در انتهای ناحیه پلاتیو و نقطه تنش نهایی و کرنش نرمی، از اختلاف مقادیر تنش در نقطه تسلیم و ابتدای ناحیه پلاتیو به دست می‌آید. با تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که فوم فولاد زنگ‌نزن با مقدار اوره ۳۲/۵ درصد وزنی و فشار اعمالی ۱۷۵ مگاپاسکال دارای بالاترین کرنش نرمی و کرنش سختی در مقایسه با سایر نمونه‌های مورد بررسی است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که وابستگی کرنش نرمی و کرنش سختی به فشار اعمالی در فرآیند تولید فوم قابل توجه نیست، اما به طور کلی در محدوده تخلخل مورد مطالعه با کاهش درصد وزنی اوره (با کاهش درصد وزنی اوره)، تمایل به نرم شدن کرنش و کرنش سختی کاهش می‌یابد. کمترین کرنش سختی و کمترین کرنش نرم کننده مربوط به نمونه با ۴۰ درصد وزنی اوره است.

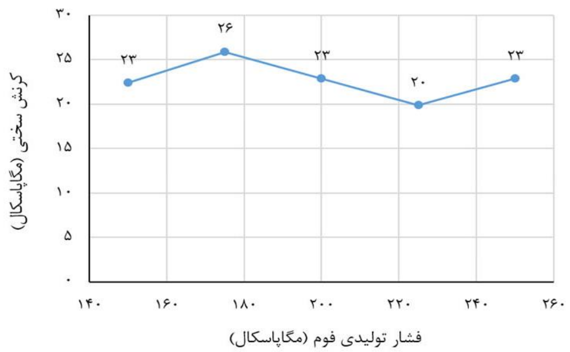


(الف)

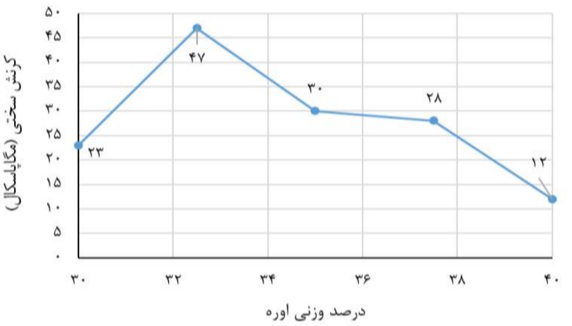


(ب)

شکل ۱۰ (الف) کرنش نرمی برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره و تحت فشارهای اعمالی مختلف و (ب) کرنش نرمی برای فوم‌های تولیدی با درصد وزنی اوره متفاوت و تحت فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال



(الف)

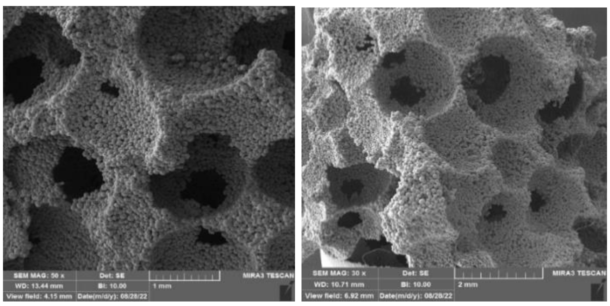


(ب)

شکل ۱۱ (الف) کرنش سختی برای فوم‌های تولیدی با ۳۰ درصد وزنی اوره و تحت فشارهای اعمالی مختلف و (ب) کرنش سختی برای فوم‌های تولیدی با درصد وزنی مختلف اوره و تحت فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

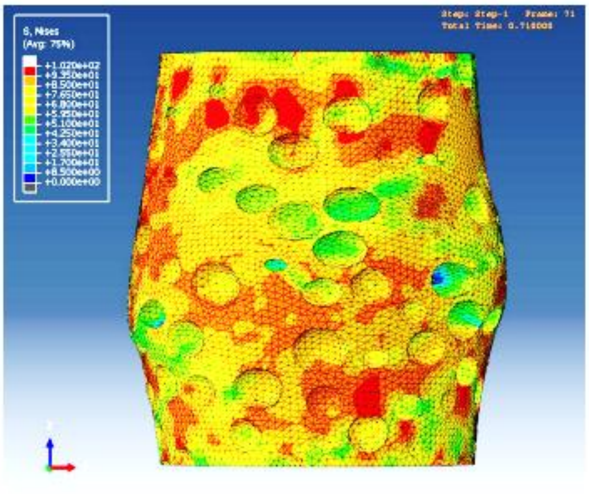
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به دست آمده از سطوح نمونه با مقدار اوره ۳۰ درصد وزنی و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال نشان می‌دهد که اوره به طور کامل حذف شده و سلول‌های کاملا کروی ایجاد شده است (شکل (۱۲)). از تصاویر مشخص است که پراکندگی ذرات اوره به خوبی انجام شده است و سلول‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. علاوه بر این، ریزتخلخل‌ها در ابعاد میکرونی در مرز ذرات پودر فولاد تف‌جوشی شده مشاهده می‌شود و این عامل خوبی در جهت بهبود میزان جذب انرژی است.



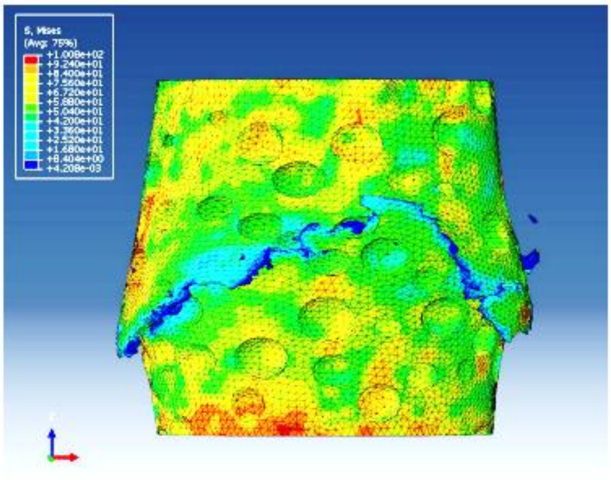
شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال

شبیه‌سازی عددی

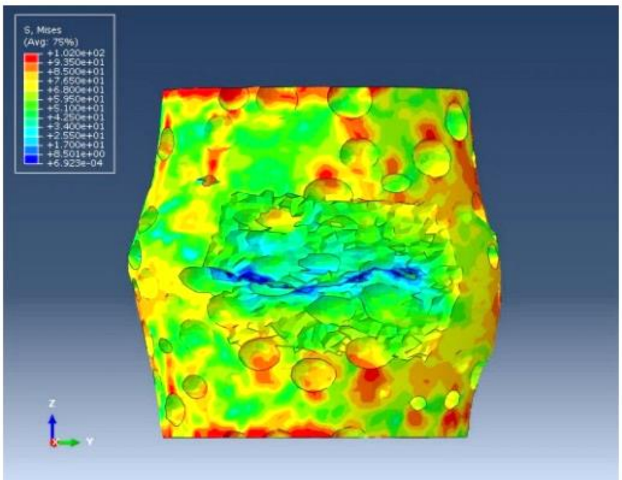
شبیه‌سازی رفتار مکانیکی شیوه‌ای نسبتا جدید به منظور ارزیابی فوم‌های فولادی است. این قبلا گزارش شده است که اندازه مش و پارامترهای موجود در معادلات بر روی منحنی‌های تنش–کرنش فشاری شبیه‌سازی شده موثر هستند [32]. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نحوه تغییر شکل و توزیع تنش حاصل از شبیه‌سازی را، به ترتیب، لحظاتی قبل از شکست و هنگام شکست نمونه نمایش می‌دهند. با مقایسه نتایج به دست آمده از بارگذاری فشاری نمونه آزمایشگاهی (شکل (۵)) و مدل شبیه‌سازی شده می‌توان گفت مکانیزم تخریب هر دو نمونه تجربی و مجازی تقریبا شبیه یکدیگر رخ می‌دهد. در شکل (۱۵)، برشی از نواحی میانی مدل در لحظه شروع شکست نمایش داده شده است. مطابق انتظار شکست از محل حفرات آغاز و با سرعت توسعه می‌یابد. ترک ایجاد شده در لحظه شکست در حفرات میانی و ضعیف‌تر آغاز می‌شود و همزمان با رشد به سطح خارجی مدل منتقل می‌گردد. همچنین فشردگی حفرات میانی نیز در اینجا قابل مشاهده است. شکل (۱۶)، منحنی تنش–کرنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون فشار را نمایش می‌دهد. برای رسم منحنی مذکور، در هر لحظه، تغییر طول کل نمونه بر طول اولیه و نیروی واکنش تکیه گاهی در امتداد نمونه بر مساحت سطح مؤثر مقطع نمونه تقسیم شده است، تا به ترتیب مقادیر لحظه‌ای کرنش عمودی مهندسی و تنش متناظر آن استخراج شود. منحنی تنش–کرنش استخراج شده از نرم افزار نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی (شکل (۴)) و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد. تفاوت اصلی مربوط به افت شدید تنش پس از نقطه تسلیم در منحنی حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با منحنی تجربی است که دلیل آن را می‌توان رشد بسیار سریع ترک در کل قطعه و فروریختن آن در شبیه‌سازی دانست. سپس، به علت وجود اصطکاک میان حفرات و برخورد آن‌ها با یکدیگر، مجدد با افزایش تنش روبرو هستیم. اما منحنی به دست آمده از آزمایش تجربی، به دلیل این که شکست حفرات به صورت موضعی اتفاق می‌افتد، بر خلاف شبیه‌سازی با افت تنش کمتری مواجه است. البته باید در نظر داشت که رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی در شرایط اعمال تنش‌های کششی و برشی متفاوت با رفتار آن‌ها در شرایط تنش‌های فشاری است و نوع بارگذاری یکنواخت و سیکلی نیز تاثیرگذار خواهد بود [33,34].



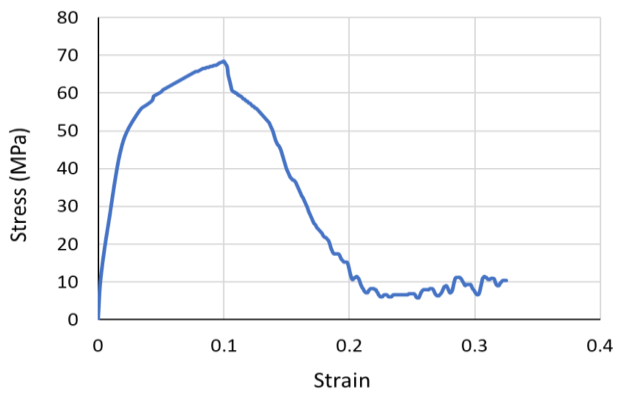
شکل ۱۳ لحظاتی قبل از شکست مدل



شکل ۱۴ لحظه شکست مدل



شکل ۱۵ نمایش برشی از مدل و ترک ایجاد شده در لحظه شکست



شکل ۱۶ نمودار تنش-کرنش در مدل شبیه‌سازی شده

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به صورت موفقیت‌آمیز صورت گرفت و اثر عوامل تولید (درصد وزنی اوره و فشار اعمالی) بر ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج اصلی در زیر فهرست شده‌اند.

۱. فشار اعمالی و درصد وزنی اوره بهینه برای تولید فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L به ترتیب ۲۵۰ مگاپاسکال و ۳۰ درصد است و برای این حالت بیشترین استحکام تسلیم و استحکام نهایی به ترتیب حدود ۱۵۲ و ۱۵۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

۲. دما و زمان مناسب برای تف‌جوشی فوم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L، ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت است.

۳. در m صد وزنی اوره و فشار اعمالی در مرحله فشردن جزء عوا مل موثر در رفتار مکانیکی فوم فولاد ز نگ‌نزن ۳۱۶L اســـت و با کاهش تخلخل (کاهش درصـــد وزنی اوره) و افزایش فشار اعمالی، استحکام بهبود می‌یابد.

۴. بیشترین ضریب کشسانی برابر با ۶۸۱ مگا پاسکال مربوط به فوم با ۳۰ درصد وزنی اوره و فشار اعمالی ۲۵۰ مگاپاسکال است. به طور کلی، روند افزایش ضریب کشسانی با کاهش درصد وزنی اوره و افزایش فشار اعمالی رابطه معکوس دارد.

۵. به طور کلی، درصـــد وزنی اوره (که وابســـته به مقدار اوره ا ست) و طول منطقه پلاتیو رابطه م ستقیمی با یکدیگر دارند و در این پژوهش، روند کاهشـــی وجود دارد و طول منطقه پلاتیو بســـتگی زیادی به فشـــار اعمالی در طی فرآیند تولید ندارد.

۶. رفتار کرنش نرمی و کرنش ســـختی به فشـــار اعمالی در طی فرآیند تولید زیاد وابســـته نیســـت. این در حالی اســـت که در محدوده درصدهای وزنی اوره مورد مطالعه، با کاهش درصد وزنی اوره و میزان تخلخل فوم، تما یل به کرنش نرمی و کرنش ســـختی کاهش می یا بد. کمترین کرنش ســـختی و کمترین کرنش نرمی مربوط به نمونه با ۴۰ در صد وزنی اوره است.

۷. برای اولین بار آزمایش فشار فوم فولادی، با مدل‌سازی صریح حفرات، به کمک روش المان محدود با موفقیت شبیه‌سازی و منحنی تنش-کرنش استخراج شد.

واژه نامه

Stainless steel foam	فوم فولاد زنگ‌نزن
Porosity	تخلخل
Space holder	فضا ساز
Urea particles	ذرات اوره
Preheat oven	کوره پیش گرم
Explicit solve	حل گر صریح
Mass scale	مقیاس جرم
Plateau	ناحیه پلاتیو
Strain softening	کرنش نرمی
Strain hardening	کرنش سختی

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A.C. Kaya, P. Zaslansky, M. Ipekoglu and C. Fleck, "Strain hardening reduces energy absorption efficiency of austenitic stainless steel foams while porosity does not", *Material and Design*, vol. 143, pp. 297–308, (2018). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.009

[2] I. Mutlu, E. Oktay, "Influence of fluoride content of artificial saliva on metal release from 17-4 PH stainless steel foam for dental implant applications, *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 29, pp. 582–588, (2013). https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.03.006

[3] C. Mapelli, D. Mombelli, A. Gruttadauria, S. Barella and E.M. Castrodeza, "Performance of stainless steel foams produced by infiltration casting techniques", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 1846–1854, (2013). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.010

[4] X. Jian, C. Hao, Q. Guibao, Y. Yang and L. Xuewei, "Investigation on relationship between porosity and spacer content of titanium foams", *Materials & Design*, Vol. 88, pp. 132–137, (2015). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.125

[5] S-f Fan, T. Zhang, K. Yu, H-j Fang, H-q Xiong, Y-l Dai, et al., "Compressive properties and energy absorption characteristics of open-cell nickel foams", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. pp. 27, 117–124, (2017). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60013-X

[6] N. Kurgan, "Effects of sintering atmosphere on microstructure and mechanical property of sintered powder metallurgy 316L stainless steel", *Materials & Design*, vol. 52, pp. 995–998, (2013). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.035

[7] X.-Y. Zhou, J. Li, B. Long, D.-W. Huo, "The oxidation resistance performance of stainless steel foam with 3D open-celled network structure at high temperature", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 435–436, pp. 40–45, (2006). https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.145

[8] H. Wang, X.Y. Zhou and B. Long, "Fabrication of stainless steel foams using polymeric sponge impregnation technology", *Advanced Materials Research* ,Vol. 1035, pp. 219–224, (2014). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1035.219

[9] N.I. Mad Rosip, S. Ahmad, K.R. Jamaludin and F. Mat Noor, "Morphological analysis of SS316L foam produced by using slurry method", *Advanced Materials Research*, vol. 1087, pp. 68–72, (2015). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1087.68

[10] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young and D. Raymont, "Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting", *Materials & Design*, vol. 55, pp. 533–541, (2014). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.027

[11] K. Essa, P. Jamshidi, J. Zou, M.M. Attallah, H. Hassanin, "Porosity control in 316L stainless steel using cold and hot isostatic pressing", *Materials & Design*, vol. 138, pp. 21–29, (2018). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.025

[12] D.P. Mondal, H. Jain, S. Das and A.K. Jha, "Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH4HCO3 as space holder", *Materials & Design*, vol. 88, pp. 430–437, (2015). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.020

[13] A. Mansourighasri, N. Muhamad and A.B. Sulong, "Processing titanium foams using tapioca starch as a space holder, J. Mater. Process", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 83–89, (2012). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.008

[14] J. Jakubowicz, G. Adamek, K. Pałka and D. Andrzejewski, "Micro-CT analysis and mechanical properties of Ti spherical and polyhedral void composites made with saccharose as a space holder material", *Materials Characterization*, vol. 100, 13–20, (2015). https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.12.006

[15] T. Aydoğmuş, E.T. Bor and Ş. Bor, "Phase transformation behavior of porous TiNi alloys produced by powder metallurgy using magnesium as a space holder", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, 2547–2555, (2011). https://doi.org/10.1007/s11661-011-0714-z

[16] S.F. Aida, M.N. Hijrah, A.H. Amirah, H. Zuhailawati and A.S. Anasyida, "Effect of NaCl as a space holder in producing open cell A356 aluminum foam by gravity die casting process", *Procedia Chemistry*, vol. 19, pp. 234–240, (2016). https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.099

[17] H. Bafti, A. Habibolahzadeh, "Compressive properties of aluminum foam produced by powder-Carbamide spacer route", *Materials & Design*, vol. 52, pp. 404–411, (2013). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.043

[18] F. Mat Noor, M.I.M. Zain, K.R. Jamaludin, R. Hussin, Z. Kamdi, A. Ismail, et al., "Potassium bromide as space holder for titanium foam preparation", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 465–466, pp. 922–926, (2014).

[19] M.F. Mahammad Rafter, S. Ahmad R. Ibrahim, "The effect of different composition of stainless steel (SS316L) foam via space holder method", *Advanced Materials Research*, vol. 1133, pp. 310–313, (2016). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1133.310

[20] Z. Abdullah, S. Ahmad and M. Ramli, "The impact of composition and sintering temperature for stainless steel foams (SS316L) fabricated by space holder method with urea as space holder", *Materials Science Forum*, vol. 888, pp. 413–417, (2017). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.888.413

[21] N. Bekoz, E. Oktay, "Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams", *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 212, pp. 2109–2116, (2012). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.015

[22] M. Mirzaei, M.H. Paydar, "A novel process for manufacturing porous 316L stainless steel with uniform pore distribution", *Materials & Design*, vol.121, pp. 442–449, (2017). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.069

[23] H.O. Gulsoy, R.M. German, "Sintered foams from precipitation hardened stainless steel powder", *Powder Metallurgy*, vol. 51, pp. 350–353, (2008). https://doi.org/10.1179/174329008X286703

[24] I. Mutlu, E. Oktay, "Characterization of 17-4 PH stainless steel foam for biomedical applications in simulated body fluid and artificial saliva environments", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 33, pp.1125–1131, (2013). https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.12.004

[25] H. Sazegaran, M. Fazeli, M. Ganjeh and H. Nasiri, "Effect of Molybdenum Addition on Microstructural and Mechanical Characterization of Highly Porous Steels", *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 5228-5238 (2020).

[26] H. Sazegaran, S. M. Moosavi Nejad, "Cell Morphology, Porosity, Microstructure, and Mechanical Properties of Porous Fe-C-P Alloys", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, pp. 257-265 (2021). https://doi.org/10.1007/s12613-020-1995-2

[27] O. Smorygo, A. Marukovich, V. Mikutski, A.A. Gokhale, G.J. Reddy and J.V. Kumar, "High-porosity titanium foams by powder coated space holder compaction method", *Mater. Lett.* , Vol.83, pp.17–19, (2012). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.082

[28] G.K.G. Shailendra Joshi, Mohit Sharma, Telang Amit, Taru Mahra, "Synthesis & characterization of stainless steel foam via powder metallurgy taking acicular urea as space holder", *Material Science Research India 12*, 43–49, (2015). http://dx.doi.org/10.13005/msri/120108

[29] H. Sazegaran, M. Hojati, "Effects of Copper Content on Microstructure and Mechanical Properties of Open Cell Steel Foams", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* , vol. 26, pp. 588-594 (2019). https://doi.org/10.1007/s12613-019-1767-z

[30] H. Sazegaran, A. Feizi and M. Hijati, "Effect of Cr Contents on the Porosity Percentage, Microstructure, and Mechanical Properties of Steel Foams Manufactured by Powder Metallurgy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 72, pp. 2819-2826 (2019). https://doi.org/10.1007/s12666-019-01758-1

[31] H. Sazegaran, "Investigation on Production Parameters of Steel Foam Manufactured Through Powder Metallurgical Space Holder Technique", *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3371-3384, (2021). https://doi.org/10.1007/s12540-020-00659-z

[32] Hamid Sagsagaran, Ali Mohammad Naserian Nik, Mohammad Reza Akbari, Ali Akbari Nejad Voor, "Evaluation of compressive behavior of steel foams produced by powder metallurgy method", *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 32, Number 1, pp.45-56 (2019). (In Persian). https://doi.org/10.22067/jmme.2024.83785.1120

[33] T. Kalpakoglou, S. Yiatros, "Metal foams: A review for mechanical properties under tensile and shear stress", *Frontiers in Materials*, vol. 9, pp. 1-18 (2022). https://doi.org/10.3389/fmats.2022.998673

[34] M. Su, Q. Zhou, H. Wang, "Mechanical properties and constitutive models of foamed steels under monotonic and cyclic loading", *Construction and Building Materials*, vol. 231, pp. 116959 (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116959